

## RESPUESTA POST FISURACIÓN DE HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS

Monetti, Diego H., Torrijos, María C., Giaccio, Graciela M. y Zerbino, Raúl L.  
Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería UNLP

**Palabras clave:** Hormigón, fibras, fisuración, creep.

### RESUMEN

La incorporación de fibras al hormigón da lugar a un material de alto desempeño, siendo uno de los mayores beneficios el control de la fisuración. Si bien existen antecedentes sobre hormigones reforzados con fibras (HRF) orientados principalmente al estudio de su comportamiento residual la respuesta del material bajo cargas de larga duración una vez que se ha fisurado la matriz cementícea constituye un área de vacancia. La orientación y distribución del refuerzo constituyen factores determinantes para la respuesta mecánica del HRF por lo que se requiere su valoración para comparar distintas mezclas. En trabajos previos se verificó que el refuerzo adquiere una distribución preponderante en planos y una notoria influencia del efecto pared y del procedimiento de llenado. En este trabajo se estudia la respuesta bajo cargas sostenidas de flexión de hormigones reforzados con distintos tipos de fibras de acero, con contenidos de refuerzo entre 20 y 40 kg/m<sup>3</sup>. Se incluyen hormigones convencionales y autcompactantes con resistencias entre 30 y 70 MPa. Se moldearon vigas de 150 x 150 x 600 mm que fueron entalladas y ensayadas según EN 14651. Luego las vigas fueron ubicadas en pórticos donde se les aplicaron cargas sostenidas de variada intensidad, incluyendo ciclos de carga y descarga. Finalmente se aserraron en planos en las tres direcciones para analizar la orientación y distribución de las fibras.

### INTRODUCCION

La incorporación de fibras al hormigón da lugar a un material de alto desempeño, donde una de las mayores potencialidades es su capacidad de transferencia de cargas y control de la fisuración tanto en sus inicios como en su posterior propagación. Entre las principales aplicaciones de los hormigones reforzados con fibras (HRF) aparecen los pavimentos y pisos industriales. Estas aplicaciones resultan particularmente sensibles a la aparición de fisuras, y si bien este tipo de defectos es casi inevitable en estructuras de hormigón, las fibras dan lugar a mejoras substanciales en la vida en servicio; la durabilidad del HRF dependerá de la estabilidad que otorguen las fibras a las fisuras existentes.

Durante décadas se ha estudiado al HRF, recientemente se ha avanzado en su caracterización mecánica en términos de parámetros residuales y se han desarrollado nuevas fibras para uso estructural. Sin embargo la información sobre su comportamiento bajo cargas en estado fisurado es bastante limitada. El método de diseño estructural para HRF de acero desarrollado por el RILEM TC 162-TDF (1) plantea la posibilidad de fisuras en servicio pero no da cuenta de la respuesta bajo cargas de larga duración de elementos fisurados. Las fibras reducen la apertura de fisuras y la evolución de las flechas en hormigones con armadura convencional (2,3). También se observó que en vigas cargadas al 60 % de su capacidad residual las deformaciones de fluencia se estabilizaron luego de unos 6 meses, por lo que se presume que las cargas sostenidas no debieran afectar la seguridad estructural. Por el contrario, la aplicación de cargas variables resultaría más crítica (4).

La principal acción del refuerzo aparece una vez que el material se ha fisurado y los mecanismos de falla involucran fenómenos de arrancamiento y deslizamiento fibra-matriz. Las fibras de acero no presentan deformaciones diferidas en si mismas y las deformaciones registradas en el HRF se atribuyen a fenómenos de deslizamiento y deformaciones de anclaje. En las fibras sintéticas pueden esperarse fenómenos de flujo viscoso en el material al ser expuesto a cargas sostenidas, a las que se deberán sumar las deformaciones por

deslizamiento y fallas de adherencia. Al analizar la evolución de la fluencia en flexión de hormigones con fibras sintéticas y de acero cargados durante más de un año al 60 % de su capacidad residual, se observaron diferencias conforme el tipo de fibra (5). En hormigón proyectado con fibras se encontró una respuesta estable para cargas de hasta el 50 % de la capacidad estática bajo cargas de corta duración (6).

En relación a la durabilidad, en estudios sobre testigos que datan de los años '70 si bien se observó corrosión de fibras acero para tamaños medios de fisuras (0,5-1,2 mm) no se encontró corrosión para fisuras < a 0,5 mm. Más recientemente ensayos sobre elementos de HRF de acero con fisuras de 0,5 mm y expuestos a condiciones representativas del ambiente marino durante un año, confirman la baja sensibilidad del HRF a la corrosión (7). Un estudio que analiza overlays de hormigón verifica que las fibras provocan una marcada disminución en la propagación del daño. La degradación se debe principalmente al crecimiento de fisuras en la interface entre el refuerzo y el sustrato, las fibras aún en bajas proporciones son suficientes para atravesar fisuras y demorar su crecimiento (8).

En HRF la orientación y distribución del refuerzo constituyen factores determinantes para la respuesta mecánica. En HRF convencional el vibrado externo favorece la orientación preferencial de las fibras en planos horizontales (9). En el hormigón autocompactante las fibras se pueden orientar en la dirección del flujo (10-12), alineándose a lo largo de las paredes de los moldes, por lo que el modo de colocación del hormigón puede tener gran incidencia (13). Algunos autores indican que el efecto de la longitud de las fibras en su alineación es despreciable (11), otros coinciden en que a mayor longitud de las fibras aumenta su orientación (12). Para un dado tipo y contenido de fibras las propiedades mecánicas, en especial la capacidad postpico, se relacionan con la densidad de fibras (14).

Este trabajo muestra resultados correspondientes a estudios desarrollados dentro del proyecto 11-I146 "Nuevos Hormigones para el desarrollo sustentable", y en el marco de la cooperación con líneas de investigación del LEMIT-CIC. Se analizan dos aspectos, la capacidad residual bajo cargas de larga duración y la orientación y distribución de fibras en hormigones vibrados y autocompactantes reforzados con distintos tipos y contenidos de fibras de acero. En relación a las cargas de larga duración se destaca que las pruebas corresponden a HRF muy dañados, ya que las aperturas de fisura iniciales alcanzaron unos 4 mm. Esto implica que las muestras se encontraban dentro de un proceso de postpico con caída creciente de la capacidad residual, previa a la aplicación de las cargas de larga duración. En la actualidad se desarrollan pruebas para anchos de fisuras variables que incluyen condiciones de servicio, cubriendo valores entre 0,2 y 1,5 mm de apertura inicial.

## **PARTE EXPERIMENTAL**

### **Materiales y mezclas**

Se analizaron diversos hormigones, algunos elaborados en laboratorio (vibrados y autocompactantes) y otros que corresponden a pruebas de bacheo de pavimentos en la periferia de la ciudad de La Plata. La Tabla 1 presenta las fibras utilizadas y la Tabla 2 una síntesis de las características relevantes de cada hormigón incluyendo la resistencia a compresión a 28 días. Los HRF A y B son mezclas típicas utilizadas en pavimentos urbanos a las que se les incorporaron 15 y 25 kg/m<sup>3</sup> de fibras; el asentamiento de los hormigones de base fue 80 y 110 mm y se redujo a 50 y 95 mm luego de incorporar las fibras. Las vigas fueron compactadas manualmente in situ. El HRF C posee características similares pero fue preparado en laboratorio incorporando mayor cantidad de fibras, el asentamiento fue igual a 40 mm y las vigas se compactaron en una mesa vibratoria. Las mezclas D a J corresponden a hormigones autocompactantes con excelentes condiciones en estado fresco (capacidad de llenado, de pasaje y estabilidad) de distintas clases de fluidez. La incorporación de fibras redujo el extendido a valores entre 575 y 720 mm.

Tabla 1. Fibras empleadas.

Identificación	L/D	Largo (mm)	Diámetro (mm)	Resistencia a tracción (MPa)	Fibras por kg
FF1	50	50	1	1100	3200
FF3	67	50	0,75	1100	5750
FS3N	44	33	0,75	1100	8700

Tabla 2. Hormigones estudiados.

HRF	Fibras		f'c (MPa)	Observaciones
	Tipo	(kg/m <sup>3</sup> )		
A	FF1	15	34,7	Compactación manual, HRF bacheo
B	FF1	25	36,7	Compactación manual, HRF bacheo
C	FF1	30	34,7	Compactación en mesa vibradora, HRF laboratorio
D	FF1	20	59,4	Autocompactante, HRF laboratorio
E	FF1	40	60,2	Autocompactante, HRF laboratorio
F	FF3	30	60,3	Autocompactante, HRF laboratorio
G	FF1	30	83,2	Autocompactante, HRF laboratorio
H	FF1	20	93,0	Autocompactante, HRF laboratorio
I	FF1	40	95,2	Autocompactante, HRF laboratorio
J	FS3N	40	89,3	Autocompactante, HRF laboratorio

## Métodos de ensayo y caracterización del HRF

Para la caracterización mecánica se ensayaron vigas de 150 x 150 x 600 mm de acuerdo a la norma EN 14651. Se utilizó un sistema con control por lazo cerrado a través de la señal de un clip gage que registra la apertura de fisura (CMOD) sobre una entalladura de 25 mm de profundidad, realizada por aserrado y ubicada en coincidencia con el centro de la luz entre apoyos. Dado que el interés de este trabajo se centra en la respuesta bajo cargas de larga duración y no en la caracterización de cada HRF en lugar de los valores promedio de cada grupo de vigas, en la Tabla 3 se indican como referencia para los estudios posteriores los resultados individuales obtenidos para cada una de las vigas, incluyendo la resistencia de primera fisura ( $f_L$ ), la resistencia máxima ( $f_{net}$ ) y las resistencias residuales ( $f_{R1}$  a  $f_{R4}$ ) obtenidas para CMOD de 0,5, 1,5, 2,5 y 3,5 mm.

En las pruebas que corresponden a este artículo los ensayos se detuvieron para una apertura de fisura (CMOD) de 4 mm, lo que implica un grado de degradación considerable y que todas las muestras han entrado dentro de un proceso de postpico con características de ablandamiento, esto es con una caída creciente de la capacidad residual. En otros estudios actualmente en desarrollo se analizan HRF con menor apertura de fisuras, en estos casos la capacidad residual puede ser muy superior según el tipo y contenido de fibras. No obstante ello, el estudio actual implica que se están analizando las condiciones más desfavorables.

Luego de fisuradas las vigas fueron retiradas de la máquina de ensayo y se ubicaron en pórticos donde, a través de un sistema de palancas, se aplicaron las cargas sostenidas. Además de cargas constantes se consideraron ciclos de carga y descarga. Se pegó en cada viga un dispositivo para fijar un extensómetro para el registro de la apertura de fisura y se ubicaron flexímetros para medir las flechas y verificar la estabilidad del proceso (Figura 1).

Finalizados los ensayos de larga duración se seleccionaron algunas de las probetas para realizar el relevamiento de fibras en las superficies de fractura, también se procedió al aserrado de los elementos en planos ubicados en las tres direcciones y se realizó un recuento de las fibras que interceptan cada plano mediante el procesamiento de imágenes de fotografías de los cortes. De este modo se obtuvieron datos para el análisis de la orientación y distribución de las fibras. Mayores detalles de los métodos utilizados se indican más adelante.

Tabla 3. Resultados de resistencia y capacidad residual (en MPa) conforme EN 14651.

Identificación	$f_{net}$	$f_{1pk}$	$f_{R1}$	$f_{R2}$	$f_{R3}$	$f_{R4}$
A1	4,5	4,5	2,2	2,1	2,0	1,9
A2	5,4	5,4	3,1	3,2	3,2	3,0
A3	4,8	4,7	3,6	3,2	3,1	2,9
B1	4,2	4,2	3,5	3,4	3,4	3,0
B2	5,2	5,2	2,5	2,2	2,2	2,0
B3	4,3	4,3	3,2	2,9	3,0	2,8
C1	4,4	4,4	2,8	2,1	1,9	1,6
C2	4,4	4,4	3,4	3,3	2,9	2,6
D1	4,5	4,5	3,3	3,3	3,2	3,0
D2	5,1	5,1	2,6	2,6	2,5	2,3
E1	5,6	5,1	4,9	4,7	4,5	4,3
E2	4,9	4,9	2,8	2,6	2,5	2,5
F1	5,3	5,3	3,1	2,9	2,6	2,5
G1	5,0	5,0	3,0	2,7	2,5	2,2
G2	5,2	5,2	2,7	2,6	2,0	1,7
G3	5,8	5,7	4,5	3,9	3,5	3,0
H1	5,7	5,7	2,8	2,5	2,2	1,9
I1	6,3	6,1	5,5	5,8	5,4	4,6
I2	6,5	5,5	6,4	5,5	4,7	4,3
J1	5,6	5,6	3,6	2,3	1,4	0,7
J2	5,7	5,6	4,1	2,8	1,7	1,2



Figura 1 – Aplicación de cargas de larga duración.

## RESULTADOS

### Respuesta de vigas fisuradas bajo cargas de larga duración

La Tabla 4 resume los ensayos de larga duración. Para cada viga se indican la tensión nominal aplicada, el tiempo de carga, el tiempo total de ensayo y el valor final de la apertura de fisura para cada escalón de carga. En la columna de los esfuerzos se indica con una R la tensión a la que se produjo la rotura de cada viga. Dado que todas las vigas se ensayaron hasta superar un CMOD de 3.5 mm, se ha indicado como parámetro representativo del nivel de sollicitación la relación entre la tensión nominal aplicada ( $f$ ) y la cuarta resistencia residual ( $f_{R4}$ ) que fuera obtenida en el ensayo normalizado de flexión. Las Figuras 2 a 8 presentan las curvas tensión – tiempo y tensión – CMOD correspondientes a vigas representativas de las respuestas observadas bajo cargas de larga duración.

La Figura 2 muestra el comportamiento de la viga A1 ante esfuerzos estáticos crecientes, la viga alcanzó en los primeros 14 días el 82 % de  $f_{R4}$ , partiendo de un primer escalón de 9 días al 31 %, luego durante los 5 días siguientes se aplicó un esfuerzo del 48 % para finalmente alcanzar el 82 % antes mencionado. Se observó una deformación creciente a niveles prácticamente constantes durante todo el periodo en el que estuvo sometida al máximo esfuerzo hasta alcanzar la rotura a los tres meses de puesta en carga.

Tabla 4. Ensayos de larga duración.

	f	CMOD	Tiempo (días)		f / f <sub>R4</sub>		f	CMOD	Tiempo (días)		f / f <sub>R4</sub>
	(MPa)	(mm)	parcial	total	(%)		(MPa)	(mm)	parcial	total	(%)
A1	0,6	0,77	9	9	31	E2	0,5	0,06	3	3	20
	0,9	1,07	5	14	48		0,6	0,08	4	7	25
	1,6 R	4,35	76	90	82		1,0	0,17	7	14	42
A2	0,6	0,05	9	9	20		2,2	0,88	56	70	89
	0,7	0,05	21	30	23		0,5	0,76	2	72	20
	2,4 R	>4	93	123	79		2,4	1,10	5	77	97
A3	0,5	0,10	9	9	19		2,6	1,80	7	84	105
	0,9	0,13	5	14	32		2,8 R	2,05		84	113
	2,0	0,49	2	16	68	F1	0,5	0,03	7	7	20
	2,4 R	2,01	9	25	83		0,6	0,05	7	14	25
B1	0,6	0,04	9	9	18		2,0	0,77	7	21	80
	0,9	0,06	5	14	31		1,9	0,83	49	70	77
	2,2	0,59	9	23	75		0,5	0,83	2	72	20
	2,7 R	1,25	4	27	89		2,1	1,02	2	74	85
B2	0,6	0,20	133	133	30		2,3	1,38	3	77	93
	1,1	0,43	49	182	55		2,5 R	2,11	7	84	102
	1,5	0,84	7	189	75	G1	1,6	0,18	4	4	72
	1,7 R	1,46	7	196	85		1,8	0,28	56	60	81
B3	0,5	0,09	9	9	19		2,3	0,83	77	137	104
	0,6	0,11	21	30	22	G2	2,6 R			137	117
	2,3	1,50	224	254	80		1,1	0,53	4	4	62
	2,8 R				100		1,5	1,25	56	60	89
C1	0,7	1,35	7	7	43	G3	1,9 R	1,27	2	62	112
	1,0	1,52	42	49	65		1,0	0,08	7	7	34
	1,4	2,12	105	154	86		1,8	0,33	70	77	61
	1,8 R	2,92	7	161	112		2,0	0,27	56	133	68
D1	0,6	0,01	98	98	21	H1	2,6 R	0,70	1	134	88
	1,2	0,62	14	112	39		1,5	0,65	34	34	79
	2,9	0,69	63	175	98		1,7	0,78	58	112	89
	3,4	0,74	16	191	113		1,9	1,00	76	168	100
	3,6 R	1,41	4	195	122		2,1 R	1,59		168	111
D2	0,6	0,21	14	14	28	I1	2,1	0,58	169	169	45
	1,1	0,33	14	28	46		2,3	0,61	4	173	49
	1,2	0,35	35	63	51		4,1 R	1,13		173	90
	2,0	0,81	16	79	87	I2	3,0	0,32	49	49	70
	2,2	0,96	2	81	94		3,2	0,45	128	177	74
	2,4	2,01	5	86	102		3,8	0,65	5	182	88
	2,6 R				113		4,5 R			182	105
J1	0,5	1,81	49	49	68	J2	1,0 R	>4		0	83
	1,0 R			49	148						
C2	0,5-1,6	0,79	Ciclos	112	21-61	E1	0,6	0,03	39	39	13
	0,5-2,5	1,56	de 7	191	25-95		0,6-2,5	0,31	Ciclos	119	57-14
	2,6 R	2,94	2	193	100		0,6-2,8	0,55	de 7	193	14-66
							0,6-3,0	0,71	de 3	210	14-69
							3,0 R	0,89		210	69

En la Figura 3 se observa la viga D1, sometida a esfuerzos estáticos crecientes, con un primer escalón del 21 % de f<sub>R4</sub> durante más de tres meses sin evidencias de crecimiento de la CMOD. En los dos meses siguientes se incrementó la carga alcanzando primero un

esfuerzo cercano al 40 % del  $f_{R4}$  donde se produjo un crecimiento del CMOD y luego se mantuvo estable durante al menos 14 días, finalmente se realizaron incrementos progresivos de carga hasta la rotura que se produjo luego 4 días a una tensión un 22 % superior a la  $f_{R4}$ . Las otras vigas de los HRF A y B presentaron respuestas similares, en el HRF D la capacidad residual fue mayor y las vigas rompieron a tensiones residuales iguales o mayores a  $f_{R4}$ . La viga G1 fue capaz de sobrellevar en forma estable esfuerzos del orden del 80 % de la resistencia residual  $f_{R4}$  y rompió para tensiones del orden del 100 %. Un análisis de la Tabla 4 muestra que estos niveles se verificaron para otros contenidos de fibras. Desde este punto surge por un lado la representatividad del concepto de tensiones residuales para valorar la respuesta en el tiempo del HRF y que para esfuerzos menores al 80 % de  $f_{R4}$  la respuesta fue en general bastante estable en el tiempo. La viga I1 muestra claramente la estabilidad del proceso para cargas menores al 50 % de  $f_{R4}$ .

Figura 2 - Viga A1. Curvas Tensión- Apertura de fisura y Tensión-Tiempo ( $f_{R4} = 1,9$  MPa).

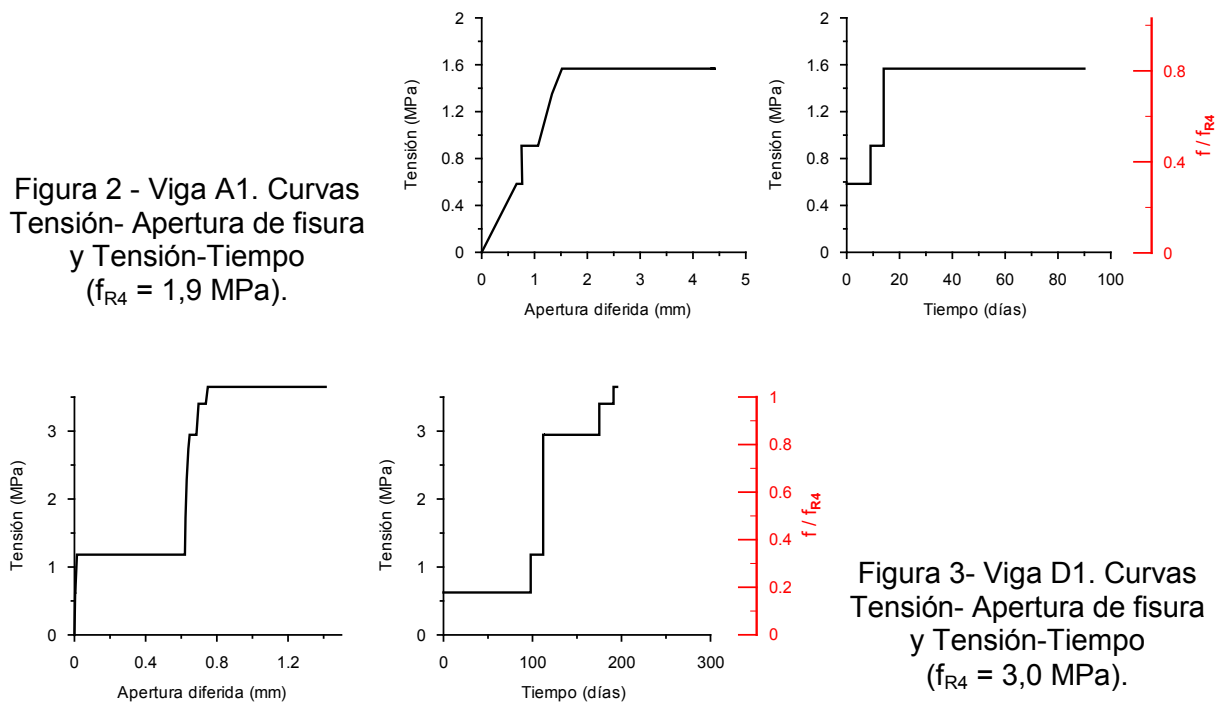


Figura 3- Viga D1. Curvas Tensión- Apertura de fisura y Tensión-Tiempo ( $f_{R4} = 3,0$  MPa).

En síntesis, en estos HRF con fisuras importantes ( $CMOD > 4$  mm) se observó que ante esfuerzos del orden del 20 al 30 % de  $f_{R4}$  las fisuras no evolucionaron. Recién se produjo un crecimiento notorio de las deformaciones diferidas para tensiones superiores al 80 % de  $f_{R4}$ . Por tal motivo se puede inferir que en la práctica, al aplicar esfuerzos cercanos a  $f_{R4}$  se encontrarán comportamientos estables bajo cargas sostenidas aún en vigas que ya hayan alcanzado aperturas de fisura significativas. Esto abre posibilidades para hormigones que según la práctica habitual de la ingeniería serían considerados fuera de servicio. Las experiencias en marcha sobre HRF con fisuras de menor ancho brindarán mayores elementos para el análisis. Sin embargo la situación podría diferir bajo cargas cíclicas.

En las vigas E1 (ver Figura 4) y C2 se aplicaron ciclos de cargas y descarga. En la primera se alternaron tensiones entre 13 y 69 % de  $f_{R4}$ . Una vez puesta en carga la viga mediante el escalón inferior de tensión se aplicaron ciclos de 7 días de duración con una tensión superior equivalente al 57 % de  $f_{R4}$ ; a los 119 días tras observar un avance bastante regular en las deformaciones, se elevó el nivel de tensión al 66 % del  $f_{R4}$ . Pasados dos meses se duplicó la frecuencia de los ciclos y se elevó el nivel de tensión al 69 % del  $f_{R4}$ , la rotura se produjo luego de 17 días (210 días en total en carga-descarga). Esto es consistente con lo observado en la viga C2 que fue ensayada bajo ciclos de carga con niveles porcentuales mayores, cercanos al 60 % los primeros tres meses y al 95 % de  $f_{R4}$  los tres meses siguientes, finalmente al crecer la carga al 100 % de  $f_{R4}$  se alcanzó la rotura.



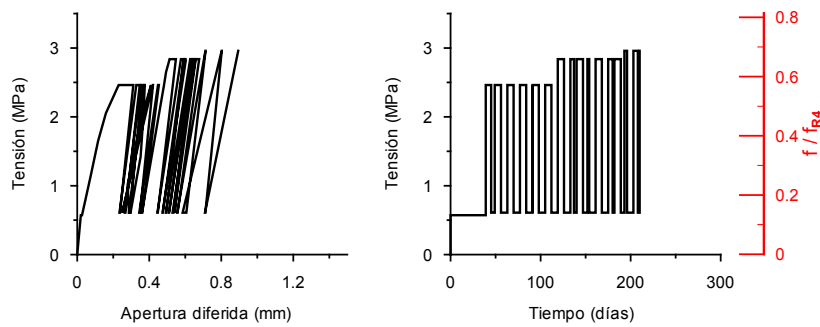


Figura 4 - Viga E1 – Curvas Tensión- Apertura de fisura y Tensión-Tiempo ( $f_{R4} = 4,3$  MPa).

## Estudio de la distribución de fibras

Se analizó la densidad y orientación de las fibras para explorar si existían diferencias entre HRF compactados por distintos medios y HRF autocompactantes. Las vigas fueron aserradas según tres direcciones o planos: transversal ( $\alpha$ ), longitudinal-perpendicular a la dirección de llenado ( $\beta$ ) y longitudinal-paralelo a la dirección de llenado ( $\gamma$ ) (Figura 5). De una mitad de las vigas se cortó una rodaja de 25 mm de espesor en dirección transversal ( $\alpha$ ) a un lado del plano de fractura, luego una mitad fue aserrada según la dirección  $\beta$  y la otra según la dirección  $\gamma$ . Cada corte ( $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ ) fue fotografiado, como se aprecia en la figura las fibras metálicas se distinguen fácilmente en la imagen. Con un software de procesamiento de imágenes se calculó el número de fibras y su mayor longitud visible en el corte. La densidad se obtiene dividiendo el número de fibras por el área de corte y conociendo la densidad en cada corte se puede inferir en qué dirección se encuentran más orientadas.

El número de orientación ( $\eta$ ), ha sido utilizado para evaluar el grado de inclinación de las fibras sobre una dada superficie (12), se calcula como  $\eta_\phi = \sum \cos \phi / N_f = \sum l_f / d_f / N_f$ , donde  $\phi$  es la dirección perpendicular al plano de corte,  $\cos \phi$  es la razón entre la longitud de la fibra visible ( $l_f$ ) en el corte y el diámetro de la fibra ( $d_f$ ) y  $N_f$  es el número total de fibras en el plano de corte. El número de orientación varía entre 0 y 1, el valor 1 significa que todas las fibras se encuentran perpendiculares al plano evaluado. En la Tabla 5 se presentan los números de orientación promedio obtenidos sobre los planos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ . La mayoría de los valores varía entre 0,37 y 0,62, siendo en general menores sobre el plano  $\beta$ , indicando que las fibras tienden a disponerse en forma horizontal tanto en hormigones convencionales (B-C) como autocompactantes (D-J). Comparando los planos  $\alpha$  y  $\gamma$  no se aprecian grandes diferencias, lo que implica que a esta escala o sobre este tipo de muestras y forma de llenado, el efecto pared y el flujo no son significativos en HAC. En hormigones convencionales se observan mayores diferencias entre  $\alpha$  y  $\gamma$  en el hormigón compactado a mano (B), donde el efecto pared podría tener mayor incidencia que la compactación en la orientación de las fibras, que en el hormigón vibrado (C). Al analizar las densidades se observa que la proporción de fibras en planos verticales es menor al 30 %. Aunque los porcentajes pueden parecer similares, un cambio de 10 % en la cantidad de fibras en la dirección axial puede dar lugar a diferencias significativas en la respuesta postpico. En las probetas no existe diferenciación en la orientación en dirección paralela o perpendicular al flujo ( $\alpha$  y  $\gamma$ ) como se observara en elementos delgados de mayor longitud (14). Se verifica en todos los hormigones una clara tendencia de las fibras a ubicarse en planos horizontales.

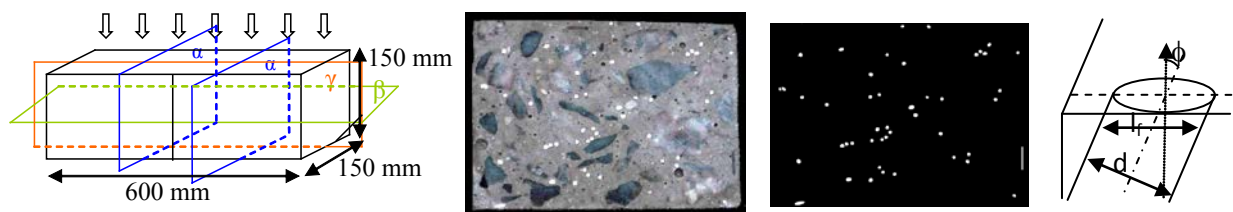


Figura 5. Esquema de cortes, imagen acondicionada y esquema de una fibra en el plano.

Tabla 5. Número de orientación y Densidad de fibras obtenidos en los planos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ .

Hormigón	Número de orientación			Densidad (f/cm <sup>2</sup> )			Densidad (%)		
	$\alpha$	$\gamma$	$\beta$	$\alpha$	$\gamma$	$\beta$	$\alpha$	$\gamma$	$\beta$
B	0,55	0,46	0,44	0,27	0,18	0,16	44	30	26
C	0,50	0,55	0,38	0,34	0,29	0,11	46	39	15
D	0,49	0,55	0,42	0,27	0,19	0,11	47	33	19
E	0,43	0,46	0,37	0,30	0,40	0,25	32	42	26
F	0,47	0,50	0,40	0,55	0,57	0,19	42	44	15
G	0,47	0,62	0,58	0,24	0,34	0,24	29	41	29
H	0,49	0,58	0,38	0,26	0,25	0,18	38	36	26
I	0,52	0,48	0,43	0,52	0,41	0,25	44	35	21
J	0,61	0,57	0,48	0,44	0,75	0,47	27	45	28
Promedio	0,50	0,53	0,43	-	-	-	-	-	-

## CONCLUSIONES

Este trabajo muestra una alternativa para valorar la respuesta bajo cargas de larga duración de elementos fisurados. En HRF con un grado de fisuración importante, se observó que para esfuerzos inferiores al 30 % de la tensión residual correspondiente a una apertura de 3.5 mm ( $f_{R4}$ ) no hubo crecimiento de las fisuras; y se alcanzó una respuesta estable para tensiones del orden del 80 % de  $f_{R4}$ . Dicha estabilidad se conservó ante ciclos de carga y descarga. Sobre los mismos hormigones se estudió la orientación y distribución de las fibras encontrando que así como ocurre en el hormigón convencional vibrado, existe una clara tendencia de las fibras a ubicarse en planos horizontales en hormigones autocompactantes.

## REFERENCIAS

- (1) RILEM TC 162-TDF 'Test and design methods for SFRC' *Mat & Struc* 36, 2003
- (2) Tan K. et al Creep and shrinkage deflections of RC beams with steel fibers *Mat Civ Eng* 6 4, 1994
- (3) Tan K.H. Saha M.K. 'Ten-year study on steel fiber-reinforced concrete beams under sustained loads' *ACI Struct Jour* 3, 2005
- (4) Granju J.L. et al 'Delayed behaviour of cracked SFRC beams', in Proc Fifth RILEM Symposium on fibre-reinforced concrete, Lyon, September, 2000.
- (5) Bernard, E.S. Creep of cracked fibre reinforced shotcrete panels. Shotcrete - More Engineering Developments, Taytor & Francis Group, pp 47-57, 2004.
- (6) Bast T. et al. 'Creep tests of plastic macro fibre-reinforced concrete - an interim report', 11<sup>th</sup> Vilser Building Material Day, Reutte, Austria, March 2007 (*in German*).
- (7) Granju, J.L., Balouch, S.U. Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks, *Cement and Concrete Research* 35, 572– 577, 2005
- (8) Turatsinze, J. et al. Durability of bonded cement-based overlays: effect of metal fibre reinforcement, *Materials and Structures* 38, 3, 321-327, 2005
- (9) Gettu, R. et al: Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens, *Materials and Structures*, RILEM, 38, pp. 31-37. 2005
- (10) Stähli, P. et al (2008): On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC, *Materials and Structures* 41:189–196.
- (11) Vandewalle, L. et al: Fibre orientation in self-compacting fibre reinforced concrete, In: 7th Int. RILEM Symposium on FRC, pp. 719-728. 2008
- (12) Yardımcı, MY. et al: Studies on the relation between fiber orientation and flexural performance of SFRSCC, In: 7th Int. RILEM Symposium on FRC, pp.711-718. 2008
- (13) Torrijos, MC, et al Placing conditions, mesostructural characteristics and post-cracking response of fibre reinforced self-compacting concrete, *Const and Build Mat*, 24, 6. 2010:
- (14) Tobes JM. et al: Estudio sobre orientación de fibras en hormigones autocompactantes en 17° R. Técnica AATH, Córdoba, Eds. V Rahhal, pp.103-110. 2008